

# 激光与光电子学进展

## 混合自由空间光/射频通信系统的性能分析

吴琰<sup>1,2,3,4</sup>, 梅海平<sup>1,3</sup>, 戴聪明<sup>1,3</sup>, 赵凤美<sup>1,2,3</sup>, 魏合理<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>安徽省先进激光技术实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>4</sup>淮南师范学院电子工程学院, 安徽 淮南 232038

**摘要** 在指数韦伯湍流信道和 Nakagami- $m$  衰弱信道条件下, 研究了基于选择合并技术的混合自由空间光/射频 (FSO/RF) 通信系统的性能。在考虑指向性误差的情况下, 推导了基于副载波调制和强度调制/直接检测方案的选择合并混合 FSO/RF 通信系统的平均误码率和中断概率, 并利用 Meijer-G 函数和扩展广义双变量 Meijer-G 函数得到其表达式。在不同副载波调制方式、湍流强度、指向性误差和 RF 信道衰弱参数  $m$  的情况下, 分析了混合 FSO/RF 通信系统和 FSO 系统的误码率和中断概率。仿真结果表明, 基于相干二进制相移键控副载波调制技术的混合 FSO/RF 通信系统性能明显优于其他三种调制技术; 相比 FSO 系统, 混合 FSO/RF 通信系统的性能更好。

**关键词** 光通信; 混合通信系统; 指数韦伯湍流信道; Nakagami- $m$  衰弱信道; 平均误码率; 中断概率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706005

## Performance Analysis of Hybrid Free Space Optical/Radio Frequency Communication System

Wu Yan<sup>1,2,3,4</sup>, Mei Haiping<sup>1,3</sup>, Dai Congming<sup>1,3</sup>, Zhao Fengmei<sup>1,2,3</sup>, Wei Heli<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>4</sup>School of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China

**Abstract** Under the conditions of exponentiated Weibull turbulent channel and Nakagami- $m$  fading channel, the performance of hybrid free space optical/radio frequency (FSO/RF) communication system based on the selective combination technology is studied in this paper. Considering the pointing errors, this paper deduces the average bit error rate and outage probability of the selective combination hybrid FSO/RF communication system which adopts subcarrier modulation and intensity modulation/direct detection scheme, and obtains their new expressions by Meijer-G function and extended generalized bivariate Meijer-G function. The bit error rate and outage probability performance of hybrid FSO/RF communication system and FSO system are investigated under different subcarrier modulation

收稿日期: 2020-11-23; 修回日期: 2020-12-26; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YF0706004)、装备预研基金(41416020204)、安徽省教育厅 2018 年度高校科学研究项目重点项目(KJ2018A0464)

通信作者: hlwei@aiofm.ac.cn

schemes, turbulence intensity, pointing errors and RF channel fading parameter  $m$ . The simulation results show that the performance of the hybrid FSO/RF communication system using coherent binary phase shift keying subcarrier modulation technology is significantly better than the other three modulation technologies, and the performance of hybrid FSO/RF communication system is better than that of FSO system.

**Key words** optical communications; hybrid communication system; exponentiated Weibull turbulence channel; Nakagami- $m$  fading channel; average bit error rate; outage probability

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 010.1290; 350.4600

## 1 引言

自由空间光(FSO)通信是一种以光束为信息载体,在视线无遮挡的空间信道(如大气信道)中进行点对点传输的无线通信技术。FSO通信系统同时具备微波通信与光纤通信的优点,具有容量大、建网快、无需授权、保密性好等优点,可用于电信最后一公里或局域网(LAN)的楼宇间链路。但地面FSO通信系统的性能不仅受大气信道的影响(如云、雾、雨、雪、气溶胶等粒子对光的散射和光学湍流),还会受系统指向性误差的影响<sup>[1]</sup>。

为了减小大气环境对地面FSO通信系统性能的影响并提高无线光通信系统的可靠性和可用性,人们提出了多种补偿技术,如孔径平均、部分相干光技术。结合FSO链路和射频(RF)链路的混合FSO/RF通信系统按照结构可分为混合FSO/RF双跳系统<sup>[2]</sup>和混合FSO/RF并行系统。混合FSO/RF双跳系统是一种中继系统,可以提供更广的覆盖范围和更大的系统容量,受到了人们的广泛关注<sup>[3]</sup>。Zedini等<sup>[4]</sup>对混合Gamma-Gamma分布的FSO链路和Nakagami- $m$ 分布的RF链路双跳系统进行了建模,其中, $m$ 为信道衰弱参数。在固定增益中继和信道状态信息(CSI)辅助中继的情况下分别推导了系统的中断概率、平均误码率(BER)和遍历信道容量的闭合表达式。混合FSO/RF并行系统又可以分为模式切换系统和同步传输系统。在模式切换的混合FSO/RF并行系统中,RF链路为备用链路,只有FSO链路的瞬时信噪比(SNR)低于预定义的阈值时,系统才会切换到该链路<sup>[5-6]</sup>;且这种模式在很大程度上依赖系统收发器上的反馈信息或CSI,增加了系统硬件的复杂度。在同步传输混合FSO/RF并行系统中,相同数据会在两个链路上同时传输,并在系统接收端对接收到的两路信号进行分集合并(最大比合并、等效增益合并及选择合并)处理后再进行信号解调<sup>[7-8]</sup>。因此,这种方案不需要反馈信息或CSI实现两链路之间的切换操作,

相比模式切换系统,同步传输系统的结构更简单也更经济。

本文首先给出了FSO链路的指数韦伯(EW)湍流模型和RF链路的Nakagami- $m$ 衰落模型,并推导出采用选择合并方案的混合FSO/RF并行通信系统(下文简称为混合FSO/RF通信系统)输出SNR的累积分布函数(CDF);然后,利用Meijer-G函数和扩展广义双变量Meijer-G函数推导出混合FSO/RF通信系统的平均BER和中断概率表达式;最后,在不同通信条件下对混合FSO/RF通信系统的性能进行了仿真分析。

## 2 系统与信道模型

在混合FSO/RF通信系统的发射端,信号经过二进制调制和副载波预调制后被分为两路,分别通过FSO和RF发射机调制到载波上,然后发射到通信链路中,接收端输出SNR最大的链路信号。

### 2.1 FSO子系统

FSO子系统采用基于子载波强度调制(SIM)技术的强度调制/直接检测(IM/DD)方案,用预调制电副载波信号 $m(t)$ ( $t$ 为时间变量)对连续激光束进行调制,调制后光束的发射功率可表示为 $P_t^{\text{FSO}} = P^{\text{FSO}}[1 + \xi m(t)]$ 。其中, $P^{\text{FSO}}$ 为FSO链路发射机的平均发射功率, $\xi$ 为调制指数且满足 $-1 < \xi m(t) < 1$ ,可防止过调制,仿真时取 $\xi = 1$ 。在接收端,通过光电探测器将接收到的激光光束通过直接检测方式转换为电信号,且副载波信号会进一步解调为原始二进制信号,因此,可将光电探测器的输出信号 $y^{\text{FSO}}$ 表示为<sup>[9]</sup>

$$y^{\text{FSO}} = P^{\text{FSO}} \eta^{\text{FSO}} R [1 + \xi m(t)] h^{\text{FSO}} + n_0^{\text{FSO}}, \quad (1)$$

式中, $R$ 为光电探测器的响应率, $n_0^{\text{FSO}}$ 是均值为0、方差为 $\sigma_n^{\text{FSO},2}$ 的加性高斯白噪声, $h^{\text{FSO}}$ 为FSO链路的信道增益。大气损耗可以由Beers-Lambert定律表示为 $\eta^{\text{FSO}} = \exp(-\alpha_{\text{at}}L)$ ,其中, $\alpha_{\text{at}}$ 为仅受天气影响

的衰减系数(dB/km)<sup>[10]</sup>,  $L$  为传输距离。在光接收机电解调器的输入端, 瞬时 SNR 可表示为<sup>[11]</sup>

$$\gamma^{\text{FSO}} = \frac{(P^{\text{FSO}} \eta^{\text{FSO}} R \xi)^2}{\sigma_n^{\text{FSO},2}} (h^{\text{FSO}})^2 = \bar{\gamma}^{\text{FSO}} (h^{\text{FSO}})^2, \quad (2)$$

$$f_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma^{\text{FSO}}) = \frac{1}{2\sqrt{\gamma^{\text{FSO}} \bar{\gamma}^{\text{FSO}}}} \frac{\alpha \rho^2}{(\eta A_0)^{\rho^2}} \left( \sqrt{\frac{\gamma^{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}}} \right)^{\rho^2-1} \cdot \sum_{t=0}^{\infty} B_t G_{1,2}^{2,0} \left[ C_t \left( \sqrt{\frac{\gamma^{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}}} \right)^{\beta} \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1 - \frac{\rho^2}{\beta} \end{matrix} \right. \right], \quad (3)$$

式中,  $B_t = \frac{(-1)^t \Gamma(\alpha)}{t! \Gamma(\alpha-t) (1+t)^{1-\frac{\rho^2}{\beta}}}$ ,  $C_t = \frac{(1+t)}{(\eta A_0)^{\beta}}$ 。其中,  $\rho = \omega_{\text{Leq}} / 2\sigma_s$  为接收机平面等效光束半径  $\omega_{\text{Leq}}$  与接收机平面抖动标准差  $\sigma_s$  的比,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数。 $\omega_{\text{Leq}}^2 = \omega_L^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ ,  $v = \sqrt{\pi} d_r / \sqrt{2} \omega_L$ ,  $d_r$  为接收机的孔径半径,  $\omega_L$  为距离光源  $L$  处

的光束腰半径,  $A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2$ ,  $\operatorname{erf}(\cdot)$  为互补误差函数,  $\theta = 2\omega_L / L$  为发散角  $\theta$  与距离光源  $L$  处光束腰之间的关系。 $\alpha$  和  $\beta$  为 EW 湍流的形状参数,  $\eta$  为尺度参数, 其值均大于 0, 可根据文献<sup>[13]</sup> 计算。利用 CDF 的积分式  $F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma^{\text{FSO}}) = \int_0^{\gamma^{\text{FSO}}} f_{\gamma^{\text{FSO}}}(x) dx$  对(3)式进行积分, 得到  $\gamma^{\text{FSO}}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma^{\text{FSO}}) = A \left( \sqrt{\frac{\gamma^{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}}} \right)^{\rho^2} \sum_{t=0}^{\infty} B_t G_{2,3}^{2,1} \left[ C_t \left( \sqrt{\frac{\gamma^{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}}} \right)^{\beta} \left| \begin{matrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{matrix} \right. \right], \quad (4)$$

式中,  $A = \frac{\alpha \rho^2}{\beta (\eta A_0)^{\rho^2}}$ ,  $\kappa_1 = 1 - \frac{\rho^2}{\beta}$ ,  $\kappa_2 = 0, 1 - \frac{\rho^2}{\beta}$ 。

### 2.2 RF 子系统

在 RF 子系统的发射端, 副载波调制信号  $m(t)$  首先被向上转换为 60 GHz 的毫米波 RF 载波信号, 再将其发送到 RF 链路中。在 RF 子系统的接收端, RF 信号被向下转换且解调为原始信号。在 RF 子系统的接收端, 输出信号  $y^{\text{RF}}$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$y^{\text{RF}} = \sqrt{P^{\text{RF}}} \sqrt{\eta^{\text{RF}}} h^{\text{RF}} m(t) + n_0^{\text{RF}}, \quad (5)$$

式中,  $P^{\text{RF}}$  为 RF 链路的发射功率,  $\eta^{\text{RF}}$  为 RF 信道的损耗,  $h^{\text{RF}}$  为信道状态,  $n_0^{\text{RF}}$  是均值为 0、方差为  $\sigma_n^{\text{RF},2}$  的加性高斯白噪声。在频率为 60 GHz 时, RF 链路的损耗  $\eta^{\text{RF}}$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$\eta^{\text{RF}} = G_t + G_r - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi L}{\lambda^{\text{RF}}} \right) - L(\alpha_{\text{oxg}}^{\text{RF}} + \alpha_{\text{rain}}^{\text{RF}}), \quad (6)$$

式中,  $G_t$  和  $G_r$  分别为 RF 信道的发送和接收天线增益,  $\lambda^{\text{RF}}$  为射频信号的波长,  $\alpha_{\text{oxg}}^{\text{RF}}$  和  $\alpha_{\text{rain}}^{\text{RF}}$  分别为由氧气吸收和雨导致的衰减参数。RF 子系统接收到的瞬时 SNR 可表示为

$$\gamma^{\text{RF}} = \frac{P^{\text{RF}} \eta^{\text{RF}} (h^{\text{RF}})^2}{\sigma_n^2} = \bar{\gamma}^{\text{RF}} (h^{\text{RF}})^2, \quad (7)$$

式中,  $\bar{\gamma}^{\text{RF}}$  为平均 SNR。在 RF 链路的 Nakagami- $m$

信道中,  $\gamma^{\text{RF}}$  的 PDF 可表示为<sup>[15]</sup>

$$f_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma^{\text{RF}}) = \left( \frac{m}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma^{\text{RF}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}}\right) = \left( \frac{m}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} G_{0,1}^{1,0} \left[ \frac{m\gamma^{\text{RF}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \left| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right. \right], \quad (8)$$

式中,  $m$  为 RF 链路的衰弱参数 ( $m \geq 0.5$ )。  $\gamma^{\text{RF}}$  的 CDF 可以通过积分表示为

$$F_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma^{\text{RF}}) = \frac{1}{\Gamma(m)} G_{1,1}^{1,1} \left( \frac{m\gamma^{\text{RF}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \left| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (9)$$

### 2.3 基于选择合并方案的混合 FSO/RF 系统

在混合 FSO/RF 通信系统中采用选择合并方案, 该方案通过检测每条链路的电 SNR 并选择 SNR 最大的信号来实现。因此, 选择合并器的输出  $\gamma^{\text{SC}}$  可表示为<sup>[16]</sup>

$$\gamma^{\text{SC}} = \max(\gamma^{\text{FSO}}, \gamma^{\text{RF}}), \quad (10)$$

$\gamma^{\text{SC}}$  的 CDF 可表示为<sup>[16]</sup>

$$F_{\gamma^{\text{SC}}}(\gamma) = \Pr[\max(\gamma^{\text{FSO}}, \gamma^{\text{RF}}) \leq \gamma] = \Pr(\gamma^{\text{FSO}} \leq \gamma, \gamma^{\text{RF}} \leq \gamma) = F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma) F_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma). \quad (11)$$

将(4)式和(9)式代入(11)式, 得到选择合并器输出  $\gamma^{\text{SC}}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma^{\text{sc}}}(\gamma) = \frac{A}{\Gamma(m)} \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right)^{\frac{\rho^2}{2}} \sum_{l=0}^{\infty} B_l G_{1,2}^{1,1} \left( \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \middle| 1, 0 \right) G_{2,3}^{2,1} \left[ C_l \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right)^{\frac{\beta}{2}} \middle| \kappa_1, \kappa_2 \right], \quad (12)$$

根据文献[17]可将(12)改写为

$$F_{\gamma^{\text{sc}}}(\gamma) = \frac{A}{\Gamma(m)} \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right)^{\frac{\rho^2}{2}} \sum_{l=0}^{\infty} B_l G_{0,0;1,1;2,1}^{0,0;1,2;2,3} \left[ \begin{matrix} - \left| 1 \right| \kappa_1 \left| \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right| \\ - \left| m, 0 \right| \kappa_2 \left| \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right| \end{matrix} \right], \quad (13)$$

式中,  $G$  为扩展广义双变量 Meijer-G 函数 (EGBMGF)。

### 3 系统性能分析

#### 3.1 平均误码率

混合 FSO/RF 通信系统中, 二进制调制方案可被用于任意一条 FSO 或 RF 链路中进行数据传输, 其平均 BER 的闭合表达式为<sup>[18]</sup>

$$P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^{\infty} (\gamma)^{p-1} \exp(-q\gamma) F_{\gamma^{\text{sc}}}(\gamma) d\gamma, \quad (14)$$

式中,  $p$  和  $q$  为描述不同二进制调制方案的 BER 参数, 具体取值如表 1 所示。其中, CBPSK 为相干二

表 1 不同二进制调制方案下的参数

Table 1 Parameters under different binary modulation schemes

Binary modulation scheme	$p$	$q$
CBPSK	0.5	1
DBPSK	1	1
CBFSK	0.5	0.5
NBFSK	1	0.5

进制相移键控, DBPSK 为差分二进制相移键控, CBFSK 为相干二进制频移键控, NBFSK 为非相干二进制频移键控。

将(12)式代入(14)式, 得到混合 FSO/RF 系统的平均 BER 为

$$P_b^{\text{multi}} = \frac{Aq^p}{2\Gamma(p)\Gamma(m)} (\bar{\gamma}^{\text{FSO}})^{-\rho^2/2} \sum_{l=0}^{\infty} B_l \int_0^{\infty} (\gamma)^{(\rho^2/2)+p-1} \cdot \exp(-q\gamma) G_{0,0;1,1;2,1}^{0,0;1,2;2,3} \left[ \begin{matrix} - \left| 1 \right| \kappa_1 \left| \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right| \\ - \left| m, 0 \right| \kappa_2 \left| \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right| \end{matrix} \right] d\gamma. \quad (15)$$

由文献[19]和文献[20]可知, 广义高斯拉盖尔积分的级数展开式为  $\int_a^{\infty} (x-a)^c \exp[-b(x-a)] \times f(x) dx \approx \sum_{\tau=1}^n w_{\tau} f(x_{\tau})$ , 其中,  $w_{\tau}$  为权重函数,  $x_{\tau}$  为横

坐标的特殊点。当系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $n$  确定时 ( $n=30$ ), 可通过软件求解出  $w_{\tau}$  和  $x_{\tau}$ , 从而将(15)式简化为

$$P_b = \frac{Aq^p}{2\Gamma(p)\Gamma(m)} (\bar{\gamma}^{\text{FSO}})^{-\rho^2/2} \sum_{l=0}^{\infty} B_l \sum_{\tau=1}^n w_{\tau} \cdot G_{0,0;1,1;2,1}^{0,0;1,2;2,3} \left[ \begin{matrix} - \left| 1 \right| \kappa_1 \left| \frac{mx_{\tau}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right| \\ - \left| m, 0 \right| \kappa_2 \left| \frac{x_{\tau}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right| \end{matrix} \right]. \quad (16)$$

当  $q=1$  时, 由文献[21]可知,  $x_{\tau}$  为广义拉盖尔多项式  $L_n^{(-1/2)}(x)$  的  $\tau$  次方根, 相应的权重系数  $w_{\tau} = \Gamma[n+(1/2)] x_{\tau} / \{n!(n+1)^2 [L_{n+1}^{(-1/2)}(x_{\tau})]^2\}$ 。

#### 3.2 中断概率

中断概率是指端到端的输出 SNR 低于一个特

定阈值  $\gamma_{\text{th}}$  时的概率, 本系统的中断概率可表示为<sup>[22]</sup>

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma^{\text{sc}} < \gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_{\gamma^{\text{sc}}}(\gamma) d\gamma = F_{\gamma^{\text{sc}}}(\gamma_{\text{th}}), \quad (17)$$

将(13)式代入(17)式中, 得到混合 FSO/RF 通信系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = \frac{A}{\Gamma(m)} \left( \frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right)^{\frac{\rho^2}{2}} \sum_{l=0}^{\infty} B_l G_{0,0;1,1;2,1}^{0,0;1,2;2,3} \left[ \begin{matrix} - \left| 1 \right| \kappa_1 \left| \frac{m\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right| \\ - \left| m, 0 \right| \kappa_2 \left| \frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}^{\text{FSO}}} \right| \end{matrix} \right]. \quad (18)$$

### 4 系统仿真分析

为了分析指向性误差、光束扩展以及大气湍流等多种因素对混合 FSO/RF 通信系统性能的影响,采用文献[12]中给出的系统参数及 EW 湍流参数:接收平面光束腰半径  $\omega_L = 10$  cm,抖动标准差  $\sigma_s = 10$  cm。当雷诺方差  $\sigma_R^2 = 0.24$  时,  $(\alpha, \beta, \eta) = (3.64, 1.94, 0.72)$  和  $(\alpha, \beta, \eta) = (3.57, 2, 0.74)$  分别是接收机孔径直径  $D$  为 15 cm 和 20 cm 时的弱湍流参数;当  $\sigma_R^2 = 1.79$  时,  $(\alpha, \beta, \eta) = (5.58, 0.68, 0.25)$  和  $(\alpha, \beta, \eta) = (5.54, 0.69, 0.27)$  分别是  $D$  为 15 cm 和 20 cm 时的中等湍流参数;当  $D = 20$  cm 时,  $(\alpha, \beta, \eta) = (5.97, 0.45, 0.1)$  为强湍流参数。

当 RF 信道的衰弱参数  $m = 2$ 、接收机孔径直径  $D = 15$  cm 且 FSO 信道为中等湍流时,不同 SIM 技术下采用 IM/DD 方案混合 FSO/RF 通信系统的平均 BER 与 SNR 的关系如图 1 所示。可以发现,相比非相干调制技术 DBPSK 和 NBFSK,相干调制技术 CBPSK 和 CBFSK 具有更高的能量效率和更优的 BER 性能,原因是相干调制技术可以在接收端预知载波相位,从而有效恢复出原始信号。如平均 SNR 为 30 dB 时,CBPSK、DBPSK、CBFSK 和 NBFSK 调制技术能达到的 BER 分别为  $2.606 \times 10^{-7}$ 、 $7.353 \times 10^{-7}$ 、 $1.208 \times 10^{-6}$  和  $3.431 \times 10^{-6}$ 。这表明经过副载波相移键控调制后的信号 BER 性能优于副载波频移键控调制技术,且 CBPSK 的 BER 性能最好。

当 RF 信道的衰弱参数  $m = 2$  并采用 CBPSK

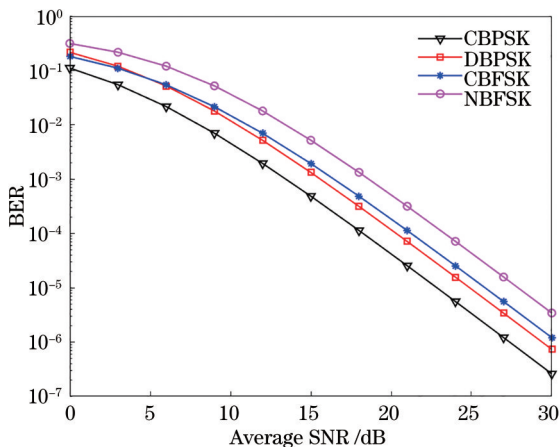


图 1 中等湍流条件下混合 FSO/RF 通信系统的平均 BER  
Fig. 1 Average BER of hybrid FSO/RF system under moderate turbulence conditions

调制时,混合 FSO/RF 通信系统在不同湍流强度和不同接收机孔径下的平均 BER 与 SNR 之间的关系如图 2 所示。可以发现,在弱湍流条件下,孔径平均效应能明显提升混合 FSO/RF 通信系统的 BER 性能;随着湍流强度的增大,孔径平均效应对混合系统 BER 性能的提升效果越来越弱。原因是混合 FSO/RF 通信系统本身就具有补偿湍流和指向性误差的能力,即在相同湍流条件下由孔径平均效应带来的混合通信系统 BER 增量的绝对值较小。如在弱湍流条件下,  $D = 15$  cm 和  $D = 20$  cm 时系统的平均 SNR 在 30 dB 的 BER 之差的绝对值约为  $2.837 \times 10^{-8}$ ,而中等湍流条件下,  $D = 15$  cm 和  $D = 20$  cm 时系统的平均 SNR 在 30 dB 的 BER 之差的绝对值约为  $3.83 \times 10^{-8}$ 。

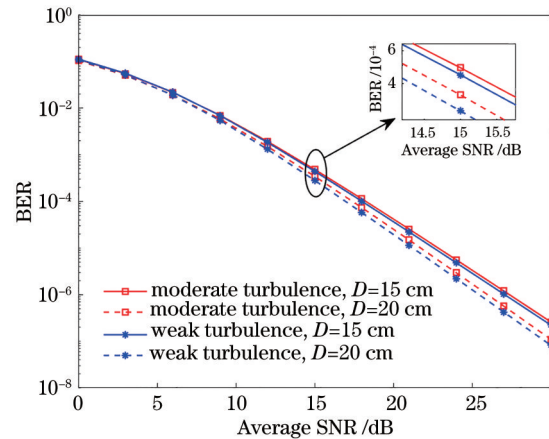


图 2 基于 CBPSK 调制方案的混合 FSO/RF 系统的平均 BER

Fig. 2 Average BER of hybrid FSO/RF system based on CBPSK modulation scheme

当  $D = 20$  cm 并采用 CBPSK 调制时,混合 FSO/RF 通信系统在不同  $m$  和湍流条件下平均 BER 与 SNR 的关系如图 3 所示。可以发现,RF 信道衰弱参数对混合通信系统 BER 性能的影响较大,即  $m$  越大,系统的 BER 性能越好。原因是 FSO 的链路性能恶化时,RF 链路的良好状态能提升整个系统的 BER 性能。如当平均 SNR 为 30 dB 且在强湍流条件时,  $m = 2$  的系统 BER 为  $1.69 \times 10^{-7}$ ,而  $m = 6$  的系统 BER 为  $1.634 \times 10^{-15}$ 。此外,随着  $m$  的增大,不同湍流强度对系统 BER 的影响会进一步减小。如当  $m = 2$  时,由弱到强的湍流条件下,平均 SNR 为 30 dB 时的 BER 之差绝对值约为  $8.707 \times 10^{-8}$ ;当  $m = 6$  时,平均 SNR 为 30 dB 时的 BER 之差绝对值约为  $8 \times 10^{-16}$ 。

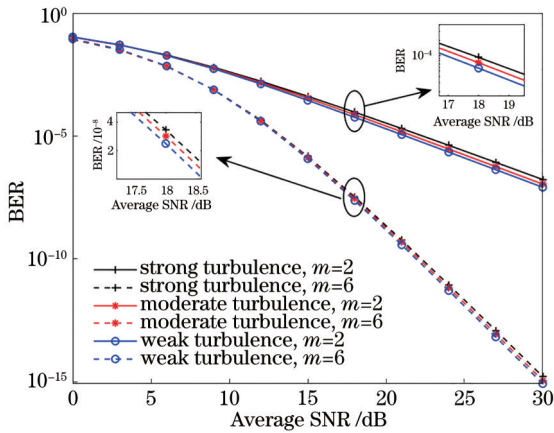


图3 不同湍流和  $m$  时混合 FSO/RF 通信系统的平均 BER  
Fig. 3 Average BER of mixed FSO/RF system with different turbulence and  $m$

当  $m=2$ 、判决阈值  $\gamma_{th}$  为 10 dB、 $D=20$  cm 且在 CBPSK 调制条件下,混合 FSO/RF 通信系统和 FSO 系统在不同湍流强度下中断概率与平均 SNR 的关系如图 4 所示。可以发现,相比 FSO 系统,混合通信系统的中断概率更小,且不同湍流强度下混合系统的差异较小。原因是混合通信系统能很好地补偿湍流和指向性误差。如在平均 SNR 为 30 dB 时,弱湍流和强湍流条件下混合通信系统的中断概率之差的绝对值约为  $3.506 \times 10^{-5}$ ,而 FSO 系统的中断概率之差的绝对值约为 0.1777。

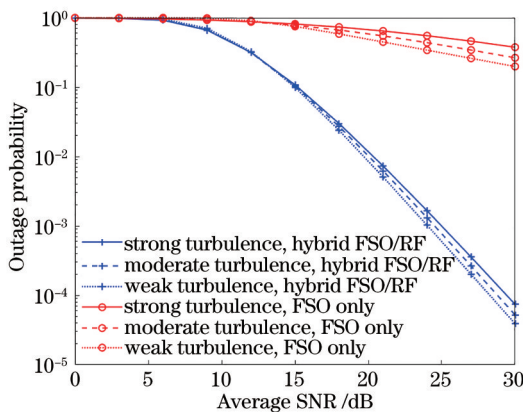


图4 不同湍流条件下混合 FSO/RF 系统和 FSO 系统的中断概率

Fig. 4 Outage probability of hybrid FSO/RF system and FSO system under different turbulent conditions

## 5 结 论

在包含指向性误差的 EW 湍流信道和 Nakagami- $m$  衰弱信道条件下,研究了采用选择合并

方案的混合 FSO/RF 通信系统的 BER 和中断概率,并推导出其解析式。理论模拟了四种副载波调制技术、不同湍流、不同指向性误差及不同 RF 衰弱参数  $m$  对混合 FSO/RF 通信系统和 FSO 系统性能的影响。重点分析了结合孔径平均技术、选择合并技术和 CBPSK 调制技术对混合 FSO/RF 通信系统的影响。仿真结果表明,采用 CBPSK 副载波调制技术的混合 FSO/RF 通信系统性能明显优于其他三种调制技术;混合 FSO/RF 通信系统的性能优于 FSO 系统,能明显降低大气湍流效应对系统性能的影响,且孔径平均效应能进一步提升混合 FSO/RF 系统的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Y, Mei H P, Dai C M, et al. Design and analysis of performance of FSO communication system based on partially coherent beams[J]. Optics Communications, 2020, 472: 126041.
- [2] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, et al. Performance analysis for mixed RF/FSO airborne communication systems over atmospheric turbulence and pointing error[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906001.  
赵静, 赵尚弘, 赵卫虎, 等. 大气湍流和指向误差下混合 RF/FSO 航空通信系统性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906001.
- [3] Ansari I S, Yilmaz F, Alouini M S, et al. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(3): 351-354.
- [4] Zedini E, Soury H, Alouini M S, et al. On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/RF systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3679-3689.
- [5] Usman M, Yang H C, Alouini M S, et al. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1-13.
- [6] Touati A, Abdaoui A, Touati F, et al. On the effects of combined atmospheric fading and misalignment on the hybrid FSO/RF transmission [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(10): 715-725.
- [7] Shakir W M R. On performance analysis of hybrid FSO/RF systems[J]. IET Communications, 2019, 13(11): 1677-1684.

- [8] Odeyemi K O, Owolawi P A. Selection combining hybrid FSO/RF systems over generalized induced-fading channels[J]. Optics Communications, 2019, 433: 159-167.
- [9] Chatzidiamantis N D, Karagiannidis G K, Kriezis E E, et al. Diversity combining in hybrid RF/FSO systems with PSK modulation[C]//2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 5-9, 2011, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [10] Prokes A. Atmospheric effects on availability of free space optics systems[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 066001.
- [11] Song X G, Yang F, Cheng J L, et al. Subcarrier intensity modulated optical wireless communications in atmospheric turbulence with pointing errors[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(4): 349-358.
- [12] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, et al. Performance analysis for mixed FSO/RF Nakagami- $m$  and exponentiated Weibull dual-hop airborne systems[J]. Optics Communications, 2017, 392: 294-299.
- [13] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 13-20.
- [14] Shakir W M R. Performance analysis of the hybrid MMW RF/FSO transmission system[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 109(4): 2199-2211.
- [15] Alathwary W A, Altubaishi E S. On the performance analysis of decode-and-forward multi-hop hybrid FSO/RF systems with hard-switching configuration[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-12.
- [16] Shakir W M R. Performance evaluation of a selection combining scheme for the hybrid FSO/RF system[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-10.
- [17] ResearchWolfram, Inc. MeijerG[EB/OL]. [2020-11-20]. <http://functions.wolfram.com/HypergeometricFunctions/MeijerG/>.
- [18] Ansari I S, Ahmadi S A, Yilmaz F, et al. A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized-K composite fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(10): 2654-2658.
- [19] Davis P J, Rabinowitz P. Automatic integration [M]//Davis P J, Rabinowitz P. Methods of Numerical Integration. Amsterdam: Elsevier, 1984: 418-461.
- [20] Holoborodko P. Abscissas and weights of classical Gaussian quadrature rules[EB/OL]. (2012-05-30) [2020-11-20]. <https://www.advanpix.com/2012/05/30/abscissas-and-weights-classical-gaussian-quadrature-rules/>.
- [21] Concus P, Cassatt D, Jaehning G, et al. Tables for the evaluation of  $\int_0^{\infty} x^{\beta} e^{-x} f(x) dx$  by Gauss-Laguerre quadrature[J]. Mathematics of Computation, 1963, 17(83): 245-256.
- [22] Vázquez C C, Ruiz R B, Vázquez B C, et al. Outage performance of DF relay-assisted FSO communications using time diversity[C]//2015 IEEE Photonics Conference (IPC), October 4-8, 2015, Reston, VA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 423-426.